

地震記録の特性と常時微動観測の比較

ソシオテクノサイエンス研究部エコデザイン部門

望月 秋利, 天羽 博紀, 庄司 孝志

本研究は、常時微動観測を地震時応答解析の評価法として利用しようと考え、検討した結果をまとめたものである。

常時微動観測の妥当性については、解析手法の1つであるH/Vスペクトル比を強震記録に対して求め、解析結果を比較し、検討した。まず、徳島県内のK-NET観測地点5地点を対象に強震記録解析を行い、地盤震動特性を求めた。次に同一地点において常時微動観測を実施し、地盤震動特性を求めた。そして、それぞれを比較検討した結果、両者に整合性があることを見出した。このことから、常時微動観測が地震時応答解析の評価法として利用可能であることを検証した。

This paper presents a study on accuracy verification of microtemor measurement technique itself and possibility to be used as a verification index of dynamic analysis, because no verification system on dynamic analyses is prepared yet, though it may be not recognized.

As the first step, microtemor measurement technique was verified using indexes of H/V spectrum, here H stands for horizontal acceleration observed, and V stands for vertical acceleration observed. In order to compare the ratio from data observed by the microtemor adjacent a measurement house of K-Net in Tokushima prefecture for strong motion seismograph to that observed by the K-Net system (accuracy of strong motion seismograph is proved; Over 2G of magnitude of acceleration is recorded), microtemor were observed near measurement houses of K-Net. As predominant period of ground and amplification ratio are found from a H/V spectrum diagram, index parameters of predominant period and amplification ratio are compared between data obtained by the microtemor and records of strong motion. Sufficient accurate coincidence of indexes between two data is found. This result concludes that the microtemor measurement technique can be used to obtain dynamic indexes instead of installation of strong motion seismograph, as ground dynamic indexes obtained by the microtemor is assured to observe them with the same accuracy as that observed by a strong motion seismograph.

キーワード：常時微動観測，地震時応答解析，H/V スペクトル，強震記録，地盤震動特性

1. はじめに

今世紀前半の発生が危惧されている南海および東南海地震が、四国を初め、西日本各地に多大な被害をもたらすことが憂慮されており、対応が急務である。本研究は、それに向けた対策の一環で、重要構造物を対象とした地震時応答解析の安定性評価の高度化による、高精度で信頼性の高い被害予測を目指したものである。

そのためには、地盤構造の推定、地層毎のパラメータの妥当性の検証がまず必要となる。また現在、地震時応答解析は実設計にも導入され、広く実施されているが、その結果の妥当性については検証されておらず、解析精

度については判断がつかない。

そこで、解析結果の検証原理として、「地震時応答解析で得られた結果をもとに、その地点の地盤震動特性を推定した場合、地盤構造、地層毎のパラメータ、解析手法が妥当であるならば、それはその地点の実測波から推定した地盤震動特性と整合性を持つはずである。」と考えた。

今回の研究はその第1段階で、常時微動観測を地震時応答解析の評価法として利用しようとするものである。これは、「解析結果の検証原理を適用するには、任意地盤の実測波から地盤震動特性を推定する必要があるが、徳島県内に設置されている強震計には数に限りがあり、解析結果を検証するには十分でない。そこで、常時微動観

測を行い、地盤震動特性を推定し、同一地点の強震記録から推定した地盤震動特性との間に整合性が認められるなら、常時微動観測を地震時応答解析の評価法として利用できる。」と考えたからである。

以上の背景を踏まえ、本研究では、地震時応答解析の評価法として常時微動観測を取り入れ、その妥当性を検証することを目的とする。常時微動観測については、観測機器の設置や移動が容易であり、簡便であるなどの利点がある。また、一点で観測される微動の水平動スペクトルを鉛直動スペクトルで除したH/Vスペクトル（振幅比）を用いることで、周辺の振動源特性を除去して地盤震動特性を安定して推定できることが知られている⁽¹⁾。

常時微動観測の妥当性については、H/VスペクトルをK-NET⁽²⁾（強震ネットワーク）で公開されている強震記録に適用し、解析結果の比較により検討を行う。そこでまず、徳島県内のK-NET観測地点 5 地点を対象に強震記録解析を行い、地盤震動特性を推定し、地盤構造との整合性を確認する。次に同一地点において常時微動観測を実施し、地盤震動特性を推定する。そして、それぞれの比較検討を行い、常時微動観測結果の妥当性を検証する。

2. 強震記録解析

2.1 K-NET の概要

K-NET とは、防災科学技術研究所が運用している全国に約 25km の間隔で建設されている強震観測施設（Fig.1）に設置された、高ダイナミック・レンジの加速度型デジタル強震計を用いて、記録された強震記録をインターネット発信するシステム（強震ネットワーク）のことである。

K-NET は、平成 7 年の阪神・淡路大震災（兵庫県南部地震）を機に、平成 8 年 6 月から観測が開始され、そのデータは全国の地震研究者をはじめ一般に公開されている。各観測施設では、その地点の強震記録の特性を理解する為、土質調査も行われている。

強震計は全て自由地盤上に設置されており、記録の均質化を計るとともに、最大 4,000gal 迄の記録をとることが可能である。

2.2 強震記録解析の手順

強震記録解析は、徳島県内に 12 点設置されている K-NET 観測地点の内、徳島市近辺の平野部や、工学基盤までボーリングが行われている 5 地点を対象に行った。Fig.2 に K-NET 観測地点図を示す。



Fig.1 K-NET observatory

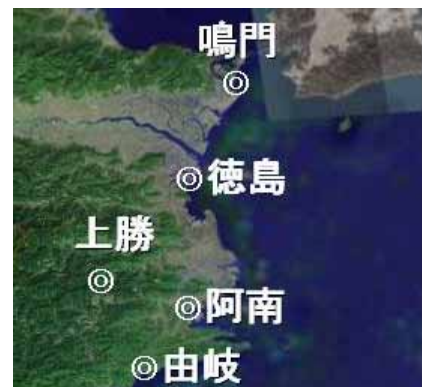


Fig.2 K-NET observation point

強震記録解析は以下の手順で行った。

K-NET より強震データファイル（NS 成分，EW 成分，UD 成分の 3 成分）をダウンロードする。Fig.3 に強震記録波形を示す。

強震データにスケールファクタを掛け、加速度データに変換する。

加速度データをフーリエ変換し、フーリエスペクトルを出力する（Fig.4）。

フーリエスペクトルを 0.4 バンド幅で平滑化する（Fig.5）。

水平動スペクトルと鉛直動スペクトルの振幅比をとり、H/V スペクトルを出力する（Fig.6）。

横軸を周波数の逆数である周期でとり、卓越周期ならびに応答倍率を推定する（Fig.7）。

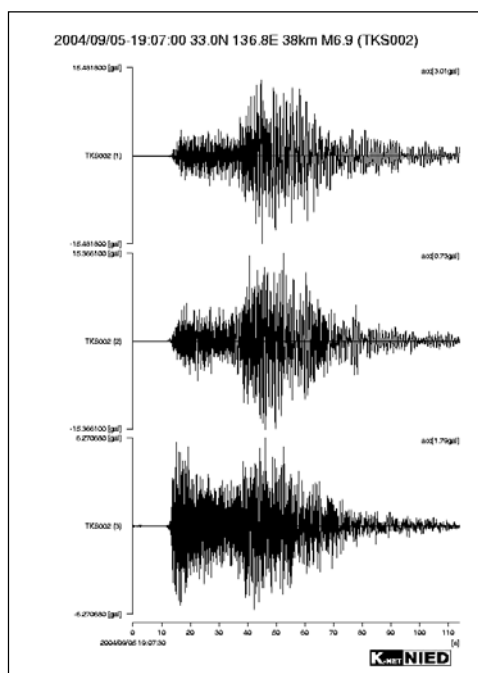


Fig.3 Strong motion record waveform

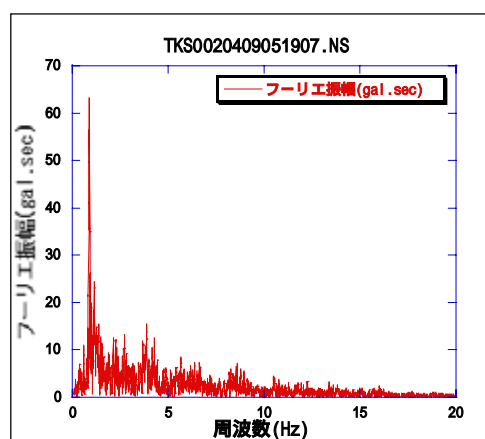


Fig.4 Fourier spectrum (NS component)

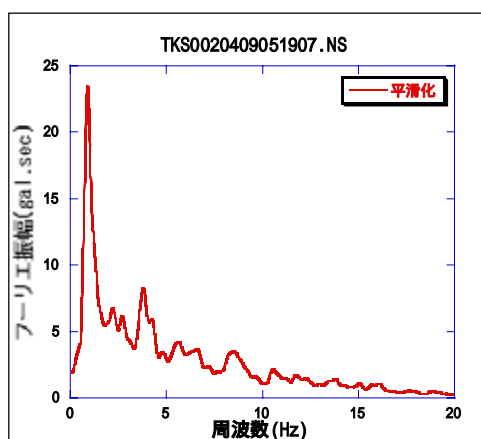


Fig.5 Smoothed Fourier spectrum (NS component)

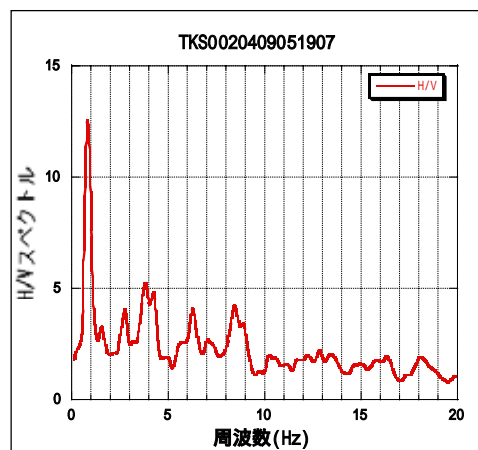


Fig.6 H/V spectrum (frequency)

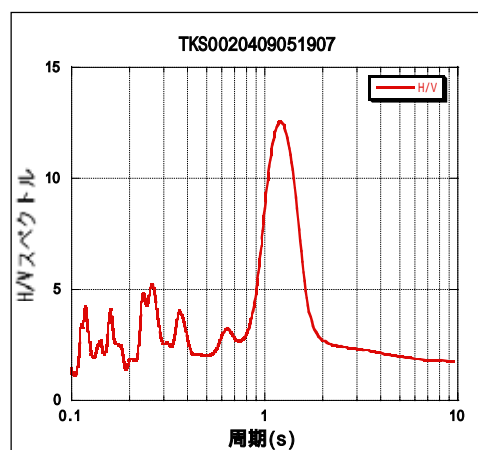


Fig.7 H/V spectrum (period)

2.3 解析結果

Table1 Strong motion record analyzed results

		鳴門	徳島	阿南	由岐	上勝
卓越周期 (sec)				0.21		0.09
		0.62	1.09		0.39	
		0.62	1.19	0.20	0.38	0.09
応答倍率				16.69		8.05
		8.17	9.89		7.38	
		7.87	8.81	18.66	8.27	7.76

地震発生日時： 2004 年 09 月 05 日 19 時 07 分
2004 年 09 月 05 日 23 時 57 分
2004 年 09 月 07 日 08 時 29 分

本節では、常時微動観測の解析手法として広く用いられている H/V スペクトルを強震記録に応用し、徳島県内の K-NET 観測地点 5 地点を対象に 9 つの地震記録を用い

て強震記録解析を行った．ここでは，南海および東南海地震域付近（紀伊半島南東沖）で起こった 3 つの地震の強震記録について求めた地盤震動特性を Table 1 に示し，考察する．

鳴門，徳島などの平野部では卓越周期が 0.6 秒～1.2 秒程度を示し，上勝などの山間部では約 0.1 秒と，概ね地盤構造を反映した結果が得られた．卓越周期に関しては，ほぼ一定値を得ることができた．応答倍率に関しては，地震ごとによるばらつきが見られたが，誤差の範囲内と判断した．

3．常時微動計測と解析

3.1 観測機器の仕様

本研究においては，Fig.8 に示す観測機器を用いて常時微動観測を行った．

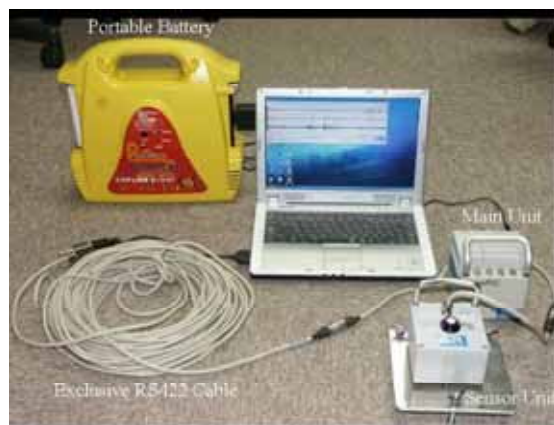


Fig.8 Observation equipment

主な観測機器の仕様を以下に示す．

名称 / 形式

- ・ポータブル振動計測装置 / NewPIC

外観形状

- ・センサー部：幅 9cm，奥行き 9cm，高さ 6cm 程度（突起部含まず）
- ・本体部：幅 10cm，奥行き 10cm，高さ 10cm 程度（突起部含まず）

電源部

- ・外部電源：AC/DC アダプター（入力 AC100～240V，出力 DC+12V）
- ・電池：単三乾電池 6 本
- ・連続使用時間：約 6 時間（アルカリ乾電池の場合）

アンプ部

- ・入力電圧：±2.5V
- ・入力インピーダンス：10k
- ・ゲインアンプ：0，20，40，60dB（プログラマブル）

フィルター部

- ・ローパスフィルター：5Hz，10Hz，20Hz（プログラマブル，12dB/Oct）

A/D 変換部

- ・分解能：22Bit
- ・Dynamic Range：112 dB
- ・CH 数：3CH
- ・サンプリング周波数：100Hz

通信部

- ・出力方法：RS422
- ・通信速度：19200bps
- ・データビット：8 ビット
- ・ストップビット：1 ビット
- ・パリティビット：無し
- ・制御方式：無手順垂れ流し

制御部

- ・CPU：32bitRISC マイクロコンピュータ

3.2 常時微動観測の手順

常時微動観測は以下の手順で行った．

K-NET の強震観測施設付近で常時微動観測地点を決定する．

センサーを水平に設置する．

センサーと本体，本体と PC を接続する．

観測ツールを起動する．

観測条件を設定する．

周辺に車，人等観測に影響を及ぼす事象がないことを確認する．

常時微動観測を開始する．

常時微動観測を終了し，データを保存する．

3.3 常時微動解析の手順

解析は以下の手順で行った．

観測データ（Fig.9）に校正値を掛け，速度データに変換する．校正値は観測条件の設定により異なる（Fig.10）．

04/03/15 14:23:10	(51790.33)	←測定開始時刻
20dB		←アンプのゲイン
20Hz		←ローパスフィルタ
site1		←地点名
X/N 1002		←コメント，機器番号
フォルダ：C:\040315		←記録フォルダ
4096 100Hz		←記録長，サンプリング
1		←記録回数
123ch		←測定チャンネル
1002 215 -2737 -9327 2769		←データ
1002 216 -3247 -5613 -4101		

Fig.9 Micro-tremor observation data file format

校正値： 0dB 時	2.15E-06	cm/s/digit
20dB 時	2.15E-07	cm/s/digit
40dB 時	2.15E-08	cm/s/digit
60dB 時	2.15E-09	cm/s/digit

Fig.10 Proofreading value

速度データをフーリエ変換し、フーリエスペクトルを出力する。

フーリエスペクトルを 0.4 バンド幅で平滑化する。水平動スペクトルと鉛直動スペクトルの振幅比をとり、H/V スペクトルを出力する (Fig.11)。

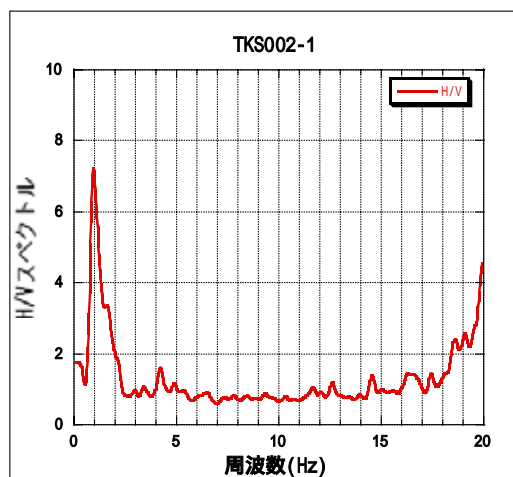


Fig.11 H/V spectrum (frequency)

横軸を周波数の逆数である周期でとり、卓越周期ならびに応答倍率を推定する (Fig.12)。

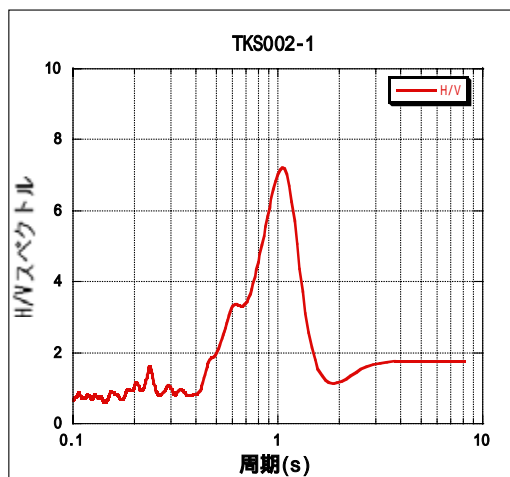


Fig.12 H/V spectrum (period)

3.4解析結果

本節では、強震記録解析で対象としたK-NET観測地点5地点において、常時微動観測を実施し、地盤震動特性を推定した。ここでは、数多く常時微動観測を実施した中でも特に、ピークがはっきりと得られたデータについて

地盤震動特性としてTable 2に示し、考察する。

Table 2 常時微動解析結果:H/Vスペクトル比解析による

	鳴門	徳島	阿南	由岐	上勝
卓越周期	0.66	1.05	0.18	0.32	0.09
(sec)	0.62	1.11	0.18	0.30	0.09
応答倍率	8.00	7.20	13.64	8.40	6.61
	7.96	7.49	13.33	7.02	6.98

鳴門、徳島などの平野部では卓越周期が0.6秒～1.2秒程度を示し、上勝などの山間部では約0.1秒と、概ね地盤構造を反映した結果が得られた。卓越周期に関しては、ほぼ一定値を得ることができた。応答倍率に関しては、測定時間の違いによるばらつきが見られたが、誤差の範囲内と判断した。また、徳島の観測地点では、はっきりとしたピーク（卓越周期、応答倍率）が現れる結果を得るには、常時微動観測をかなり繰り返さなければならなかった。これらの原因としては、観測地点周辺の振動源の多さが原因と考えられる。H/Vスペクトルの特徴のひとつに、周辺の振動源特性を除去して表層地盤の卓越周期や応答倍率を安定して推定できることが挙げられているが、今回観測を行ってみると、やはり周辺の振動源が常時微動観測に及ぼす影響は大きく、そういった場所で観測を行う場合は、前もって振動源の少ない時間帯などを検討してから実施する必要がある。

4. 解析結果の比較

4.1 強震記録解析結果と常時微動解析結果の比較

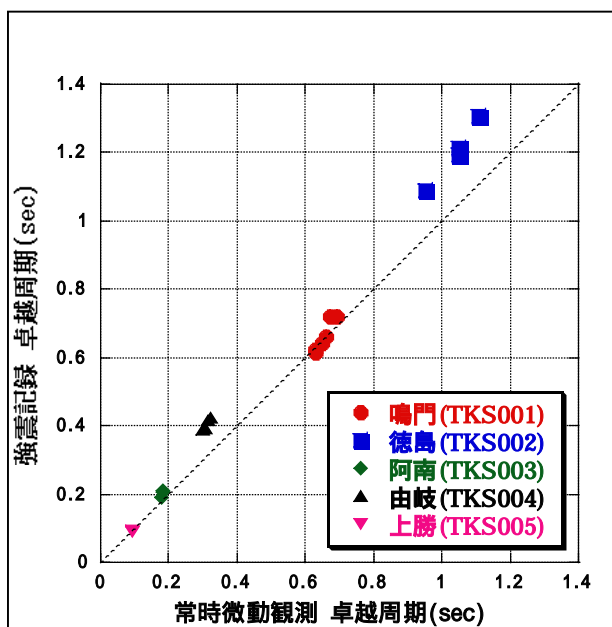


Fig.13 卓越周期比較

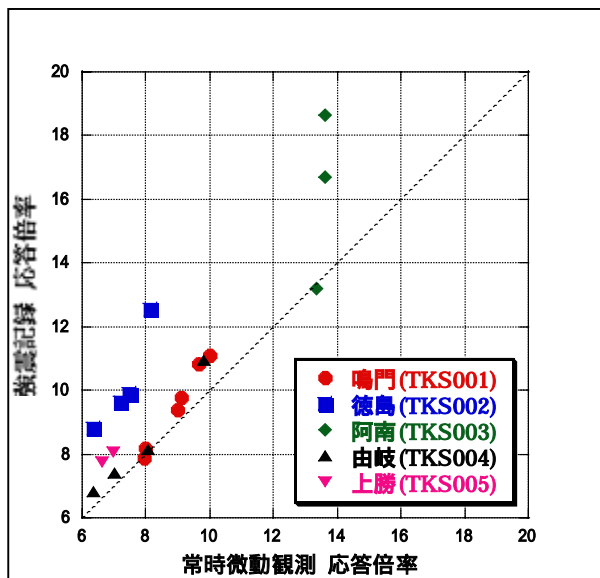


Fig.14 応答倍率比較

Fig.13, 14 は、常時微動観測から求めた卓越周期・応答倍率と K-NET の強震記録から求めた卓越周期・応答倍率とを比較した図である。

Fig.13, 14 は破線が両軸の 1:1 を表し、破線に近いほど両データが同じ値であることを示す。

Fig.13 の卓越周期の比較では、5 地点とも両データがほぼ一致している。一方、Fig.14 の応答倍率は、破線よりも全体的に少し上方に偏っている。これは常時微動観測から求めた応答倍率よりも、強震記録から求めた応答倍率の方が大きい値を示していることを表している。この原因としては、強震記録の規模の大きさから、地盤震動特性だけでなく、震源特性や伝播特性が影響を及ぼし、応答倍率が大きくなったのではないかと考えられる。しかし、ばらつきがあるとはいえ、概ね整合性が見られる。このことから、常時微動観測が地震時応答解析の評価法として利用可能であると考えられる。

4.2 解析結果と道示法との比較

本節では、常時微動観測と強震記録からそれぞれ求めた卓越周期を用いて、道路橋示方書⁽³⁾で示されている地盤の特性値との比較、また同示方書で示されている地盤種別の判定を行った。

今回比較に用いた観測地点は、K-NET 観測地点 5 地点のうち、工学基盤までボーリングが行われている阿南、由岐、上勝の 3 点を対象とした。

(1) 地盤の特性値

耐震設計上の地盤種別は、対象地盤の卓越周期をもとに判定する。道路橋示方書では式(1)により算出する地盤の特性値をもとに、地盤種別の判定を行う。ここでい

う地盤の特性値とは、微小ひずみ振幅領域における表層地盤の基本固有周期である。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad (1)$$

ここに、

T_G : 地盤の特性値 (sec)

H_i : i 番目の地層の厚さ (m)

V_{si} : i 番目の地層の平均せん断波弾性速度 (m)

i : 当該地盤が地表面から耐震設計上の基盤面まで

n 層に区分されるときの地表面から i 番目の地層番号

式中の V_{si} については PS 検層から得られた値を直接用いる場合と、式(2)に示すボーリングデータの N 値から推定する算定式の両方を用いた。

なお、 N 値から推定する算定式には、徳島地区における「望月の V_s 値推定式」⁽⁴⁾を用いた。

$$V_s = 74.8 N^{0.137} H^{0.25} d \quad (2)$$

ここに、

H : 深度 (m)

d : 係数、粘性土=1、砂質土=0.962、礫=1.19

Table 3 各手法による卓越周期の比較

	卓越周期 (sec)			
	常時微動	K-NET	PS 検層	N 値
阿南	0.18	0.20	0.30	0.24
由岐	0.30	0.38	0.23	0.29
上勝	0.09	0.09	0.13	0.09

V_s の推定は望月式を適用

Table 3 に、常時微動観測と強震記録からそれぞれ求めた卓越周期と、式(1)を用いて PS 検層から得られた V_s より算出した T_G 、 N 値から求めた V_s より算出した T_G を示す。

阿南、由岐、上勝の 3 点は複雑な地盤構造をしているが、それでも常時微動観測と強震記録、 N 値からそれぞれ求めた卓越周期に整合性が見られた。

PS 検層については測定間隔が最小でも 1m、広くて 2~3m もありボーリングよりも荒い測定となっていることから、このような結果に至ったのではないかと考える。

(2) 地盤種別の判定

地盤種別は、式(1)から求まる地盤の特性値 T_G をもとに Table 4 により区別する。

Table 4 耐震設計上の地盤種別

地盤種別	地盤の特性値 (sec)
I 種	$T_G < 0.2$
II 種	$0.2 \leq T_G < 0.6$
III 種	$0.6 \leq T_G$

地盤種別の目安として、Ⅰ種地盤は良好な洪積地盤及び岩盤、Ⅱ種地盤は沖積地盤のうち軟弱地盤、Ⅲ種地盤はⅠ種地盤及びⅡ種地盤のいずれにも属さない洪積地盤及び沖積地盤とされている。

Table 4 を用いて上記の同ケースにおいて地盤種別の判定を行った結果を、Table 5 に示す。

Table 5 地盤種別比較表

	地盤種別			
	常時微動	K-NET	PS 検層	N 値
阿南	I	II	II	II
由岐	II	II	II	II
上勝	I	I	I	I

Table 5 より、由岐はⅡ種地盤、上勝はⅠ種地盤であると推定される。由岐と上勝は砂質土が多く似ているが基礎盤深さが上勝の方が浅いことからⅡ種地盤に区分されており、その地盤の特性を反映した結果であるといえる。

阿南に関しては常時微動観測ではⅡ種地盤、強震記録、PS 検層、N 値ではⅢ種地盤と推定されたが、値がⅡ種地盤とⅢ種地盤の判定境界上であるのでこのような結果となった。

このことから、常時微動観測が地震時応答解析の評価法として利用可能であると考えられる。

5. 結論

本研究では、地震時応答解析の評価法として常時微動観測を取り入れ、その妥当性を検証することを目的とした。以下に得られた主な成果をまとめる。

(1) 常時微動の解析手法の1つであるH/Vスペクトルを強震記録に応用し、徳島県内のK-NET観測地点5地点を対象に強震記録解析を行い、地盤震動特性を推定し、地盤構造との整合性を確認した。

(2) 強震記録解析で対象としたK-NET観測地点5地点において、常時微動観測を実施し、地盤震動特性を推定した。さらに強震記録解析結果との比較検討を行い、整

合性を確認し、常時微動観測手法の妥当性を確認した。

(3) 常時微動観測と強震記録からそれぞれ求めた卓越周期を用いて、道路橋示方書で示されている地盤の特性値との比較及び地盤種別の判定を行った。その結果、常時微動観測と強震記録、ボーリングデータからそれぞれ求めた卓越周期について整合性を確認し、強震記録N値(但し V_s は望月式適用)で妥当な卓越周期、地質種別を判定できることがわかった。

以上の成果より、常時微動観測が地震時応答解析の評価法として利用可能であることを検証した。

謝 辞

本研究を行っていく中で、ご助言頂いた、徳島大学大学院の澤田勉教授、中央建設コンサルタントの藤川健太氏に厚く御礼申し上げます。また、強震記録および土質データについて防災科学技術研究所のK-NETの情報を利用させていただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村豊, 上野真: 地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み, 第7回日本地震工学シンポジウム講演集, 265 - 270 (1986)。
- 2) 防災科学技術研究所: 強震ネットワーク K-NET。
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 耐震設計編, 丸善, 25 - 27 (2002)。
- 4) 高速道路技術センター: 平成 17 年度 四国横断自動車道軟弱地盤上の橋梁基礎に関する技術検討報告書, 11-22 (2006)。